

(様式 5)

指導教員 承認印	
-------------	--

2019 年 3 月 20 日
Year Month Day

学位（博士）論文要旨
(Doctoral thesis abstract)

論文提出者 (Ph. D. candidate)	工学府博士後期課程 電子情報工学専攻 専攻 (major) 平成 27 年度入学(Admission year) 学籍番号 15834201 氏名 森田 一弘 印 (student ID No.) (Name) Kazuhiro MORITA (Seal)
主指導教員氏名 (Name of supervisor)	涌井 伸二 教授
論 文 題 目 (Title)	オブザーバを用いた真空雰囲気における計測・制御に関する研究
論文要旨（2000 字程度） 荷電粒子線を用いた半導体集積回路の製造装置・検査装置の高精度化に関する研究である。半導体集積回路は微細化が著しく、その製造や検査には分解能が高い荷電粒子線装置が利用されている。その高精度化には温度の安定化、制振性能向上、試料位置決め精度の向上が必須である。しかし、真空雰囲気で動作し、荷電粒子線を用いるため、（１）温度制御が難しい、（２）振動センサを使用できない、（３）高精度な試料位置決め制御が難しい、といった課題がある。さらに、荷電粒子線装置を制御する組込みソフトウェアには高信頼性と短納期の両立が求められている。本研究では、オブザーバを応用した非接触試料温度計測・制御システム、荷電粒子線照射カラムのアクティブ除振システム、安定化試料位置決めステージを設計した。また、組込みソフトウェア開発の開発効率向上と開発期間短縮を両立する非実機テスト支援システムを開発した。これらについて、実装置を用いた検証結果を示した。 1 章「序論」では、本研究の背景と目的、従来の研究について述べている。まず、半導体集積回路の技術開発動向について述べ、次に、本研究に関する温度計測技術、振動抑制技術、位置決め制御技術に関する従来研究について述べている。さらに、組込みソフトウェアの開発環境に関する従来研究について述べている。 2 章「荷電粒子線装置の概要と課題」では、まず、本研究の研究対象である荷電粒子線装置の概要について述べるとともに、課題を明らかにしている。その後、研究方針を述べている。微細な半導体集積回路の製造・検査に用い、真空雰囲気で動作する装置の特徴から、計測・制御に必要な状態検知センサを取り付けられないという課題がある。また、大型装置であることから組込みソフトウェアのテストが十分に実施できず、製品開発が遅延	

するという課題もある。このことから、本研究は装置の特性を利用したオブザーバ（状態観測器）を用いて高精度化を実現することとした。さらに、実機テスト重視のソフトウェア開発手法から非実機テスト重視の開発手法へ転換することを研究方針とした。

3 章「オブザーバのレビュー」では、本研究で重要な役割を担うオブザーバの原理および種類と、その特徴および実用例について述べている。

4 章「荷電粒子線装置の計測と制御」では、オブザーバを用いた荷電粒子線装置の高精度化の実施内容および結果について述べている。非接触試料温度計測・制御では、真空雰囲気における熱伝導モデルを構築した。それを用いた未知入力オブザーバによる非接触型試料温度推定器を開発し、当該推定温度を用いた高精度温度制御システムを実現した。アクティブ除振システムでは、電子線照射精度を向上させるための電子線カラム制振システムを開発した。まず、電子線装置全体の振動モデルを構築した。それを用いて、電子線偏向に影響を与える振動センサが不要な電子線カラム振動推定器を開発した。その後、それを用いたアクティブ除振システムを実現した。さらに、設置場所による特性変動に対応するための調整パラメータを備えたアクティブ除振システムとした。試料位置決めステージでは、摩擦摺動型ステージの高精度化について述べている。当該ステージは位置や駆動電流に対する依存性によって制御特性が変動するため、高速化と高精度化の両立が難しい。これに対し、位置依存性および推力依存性を考慮した試料位置決めステージのモデルを構築した。これを用いた外乱オブザーバおよび位置決め制御システムを実現した。

5 章「非実機テスト支援システム」では、荷電粒子線装置における組込みソフトウェアの開発効率および信頼性向上について述べている。真空雰囲気かつ大型の装置においては組込みソフトウェアの実機テストを実施することが容易でないため、ソフトウェア開発効率および信頼性が低下するという課題がある。これに対し、装置全体のハードウェア動作を模擬し、ハードウェアの確率的故障率を模擬するシミュレータを構築した。このシミュレータを利用し、装置内の全ソフトウェアを同時実行可能な非実機テスト支援システムを開発した。

6 章「結言」では、本研究の結言を述べている。非接触試料温度計測・制御システム開発の結果、真空雰囲気において $0.002\text{ }^{\circ}\text{C}$ の温度制御精度を実現した。アクティブ除振システム開発の結果、電子線照射位置精度が 15 nm から 1.5 nm に向上した。試料位置決めステージ開発の結果、位置決め精度を 30 nm から 10 nm に向上した。非実機テスト支援システムの開発の結果、非実機テストを充実させることで、実機テスト時間を $1/4$ に低減すると同時に、ソフトウェア不具合を $1/10$ に低減できた。今後の課題として、真空雰囲気に加熱と冷却の両システムを備えた温度制御システムの実現と、真空雰囲気における試料ステージのさらなる動特性の解明を述べている。

(英訳) ※和文要旨の場合(400 words)

This thesis is a study of an improvement of precision as for inspection apparatus to inspect of semiconductor devices. The apparatus using particle charged beam has high resolution. However, the apparatus has three issues.

- (1) It is difficult to control temperature due to less thermal conductance.
- (2) It is difficult to use acceleration sensor due to avoid magnetics fluctuation.
- (3) It is difficult to precise positioning due to varying dynamics in vacuum environment.

As for (1), precise contactless temperature measurement and control system has been developed. Mechanism of radiant heat in vacuum environment has been clarified. Unknown input observer has been designed based on a model of radiant heat. After that, feedback control system has been developed. As for (2), high precision active damping system with variable parameter has been developed. Mechanism of coupled vibration between electron beam column and vacuum chamber has been clarified. State observer to observe vibration of electron beam column has been developed. The state observer includes adjustable parameter. High precision active damping system based on the state observer. As for (3), precision positioning system using friction drive type stage has been developed based on disturbance observer which includes position depending parameter. Changing of dynamics of a friction drive type positioning stage in vacuum environment has been shown. Disturbance observer which observes dynamics of a friction drive type positioning stage has been designed. After that, precise positioning system in vacuum environment has been developed based on the disturbance observer which includes position depending parameter. In addition, non-machine testing support system has been developed because software equipped into the apparatus is required high reliability and speedy development.